

TC4合金激光立体成形孔洞类缺陷的超声检测

阮雪茜^{1,2} 林鑫¹ 黄春平³ 黄卫东¹

¹西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072

²中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241

³南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063

摘要 以TC4钛合金激光立体成形件为研究对象,探讨其内部、表面及近表面孔洞类缺陷与超声波的相互作用关系。研究表明,在相同检测条件下,对于TC4钛合金激光立体成形件中同深度不同孔径的长横孔缺陷,超声反射波幅值随长横孔直径的增加而增加;对于成形件中同孔径不同深度的长横孔缺陷,超声反射波幅值随长横孔所在深度增加而减小;利用5PΦ8纵波直探头,能发现激光立体成形TC4钛合金中0.6 mm大小的孔洞类缺陷;超声表面波沿深度方向发现TC4钛合金激光立体成形件中槽型和孔型缺陷的能力均小于4 mm,且孔型缺陷比槽型缺陷更难发现。

关键词 激光技术; 激光立体成形; TC4钛合金; 超声波; 表面波

中图分类号 TG115.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1203001

Ultrasonic Nondestructive Testing of Hole Type Defects in Laser Solid Forming TC4 Alloy

Ruan Xueqian^{1,2} Lin Xin¹ Huang Chunping³ Huang Weidong¹

¹State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

²Avic Commercial Aircraft Engine Co, Ltd, Shanghai 200241, China

³Processing Defense Science and Technology Key Laboratory of Light Alloy, Nanchang Aeronautical University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract The interaction between the inner, surface and near-surface defects of laser solid forming TC4 alloy and ultrasonic are studied. The results show that under the same testing conditions, reflection amplitude value increases with the increasing of long lateral hole diameter for the long lateral hole defects with the same depth and different diameters; and the reflection amplitude value decreases with the increasing of the depth of long lateral hole for the long lateral hole defects with the same diameter and different depths; holes within 0.6 mm diameter can be found in laser solid forming TC4 alloy using 5PΦ8 straight longitudinal wave probe. The ability of SAW to found defects less than 4mm from the surface in the depth direction is less than 4 mm and the hole defect is harder to find than the groove.

Key words laser technique; laser solid forming; TC4 titanium alloy; ultrasonic; surface wave

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 120.7250

收稿日期: 2015-05-11; 收到修改稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家 863 计划 (2013AA031103)、国家自然科学基金 (51323008、51105311、51271213)、国家 973 计划 (2011CB610402)、高等学校博士学科点专项科研基金项 (20116102110016)

作者简介: 阮雪茜(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光加工及无损检测方面的研究。

E-mail: 18292460690@163.com

导师简介: 黄卫东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事增材制造理论、技术及应用方面研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn

1 引 言

TC4钛合金作为一种轻质高强度结构材料,因其所具有的优异综合力学和物理性能,被广泛应用于航空、航天、船舶等领域,是制造航空发动机重要零部件和飞机结构件的重要工程材料^[1-7]。但TC4钛合金所具有的高熔点及大的变形抗力,使得对于复杂构件,采用传统加工方法加工非常困难,同时材料利用率低^[8]。20世纪90年代初发展起来的激光立体成形技术以离散、堆积为手段,通过增材方法直接成形复杂结构零件,成形效率高,成形件使用性能好^[9-14],已经成为大型复杂TC4钛合金结构件的一种重要成形和加工手段。激光立体成形技术从逐点成形,工艺的波动可能引起缺陷,其中熔合不良缺陷是影响激光立体成形件力学性能最为关键的一个因素^[15],同时,表面和近表面的槽孔缺陷对成形件的疲劳性能也有着重要的影响。激光成形的近形制造特征,限制了许多传统无损检测(NDT)方法实施的有效性,而且激光成形的组织特征与传统具有较大差别^[16-19],会导致NDT过程中的一些特性也与以往具有较大差别。这些使得,若要对成形件进行可靠的应用,对激光立体成形件进行准确的NDT非常重要。本文重点针对TC4钛合金激光立体成形件中可能出现的内部、表面及近表面孔洞类缺陷,探讨其与超声波的相互作用关系,并初步探索了内部、表面及近表面孔洞类缺陷的超声探伤工艺。

2 实验材料及方法

研究所用TC4钛合金激光立体成形试样(LSF-TC4)是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的LSF-III系统上制备完成的。该系统由3 kWCO²激光器、五轴四联动数控工作台、高精度送粉器、同步送粉系统和惰性气体保护箱等组成。实验所用粉末材料为粒度44~178 μm的TC4钛合金球形粉末,采用锻压成形的TC4板材作为基材。实验前将TC4粉末在120℃真空条件下进行干燥处理,以除去粉末中吸附的水分;用砂纸打磨锻件基材,并用乙醇和丙酮溶液依次清洗,以减少表面油污等杂质对成形过程造成的影响。

为了定标,首先通过控制搭接率,制备出含熔合不良缺陷的激光立体成形TC4钛合金试样进行超声探伤。LSF实验采用的工艺参数如表1所示,试样分为4组,分别为0%搭接试样、20%搭接试样、30%搭接试样和40%搭接试样。利用GE USM 35型号手持超声探伤仪对4组试样进行探伤,采用5PΦ8纵波直探头,机油作耦合剂,并对试样进行X射线探伤以进一步研究缺陷的性质。

表1 TC4激光立体成形工艺参数

Table 1 Parameters of laser solid forming of TC4 alloy

Laser power /kW	Scanning speed /(mm/s)	Increment of Z /mm	Laser spot diameter /mm	Powder feeding rate /(r/min)	Carrier gas flow /(L/h)	Overlap ratio /%
2~2.5	8~10	0.2~0.5	3	8~10	400	0~40

在前述研究基础上,为定量分析LSF-TC4内部缺陷,选取无缺陷试块用电火花方法在试样内部加工不同内孔直径的横通孔,如图1所示,其中孔1~孔3距离B表面5 mm深,孔径分别为0.6、1、1.2 mm,孔4~孔6距离B表面15 mm深,孔径分别为0.6、1、1.2 mm,孔7~孔9距离B表面20 mm深,孔径分别为0.6、1、Φ1.2 mm,并利用Olympus SX型超声相控阵探伤仪对实验试样进行探伤分析;为定量分析LSF-TC4表面缺陷的超声效应,从同样的无缺陷试块中切取试样,制作4 mm厚LSF-TC4钛合金薄板,将薄板试样作开槽和打孔处理如图2所示。所有试样经磨床加工后试样表面粗糙度R_a<3.2 μm,采用5 MHz 6x6BM表面波探头对薄板试样进行探伤。

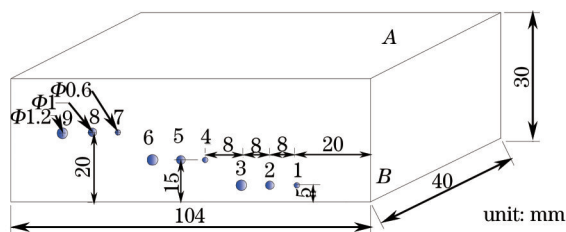


图1 LSF-TC4长横孔加工示意图

Fig.1 Diagram of long horizontal holes in LSF-TC4 alloy

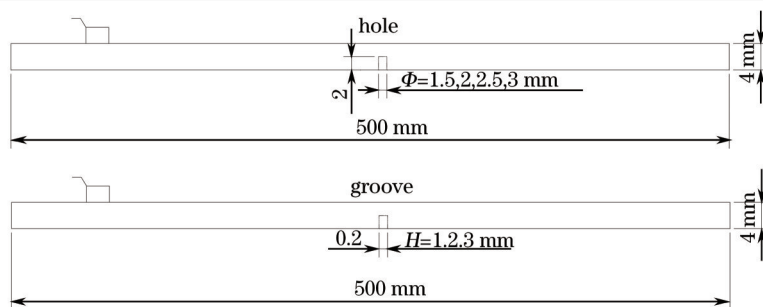


图2 LSF-TC4表面槽、孔加工示意图

Fig.2 Diagram of groove and hole on surface of LSF-TC4 alloy

3 结果与分析

3.1 内部孔洞类缺陷结果分析

图3为采用不同搭接率激光立体成形的TC4钛合金试样的宏观组织照片。可以看到,其他参数不变的情况下,随着搭接率的增大,试样中熔合不良缺陷逐渐减少直至消失。从图3(a)所示的0%搭接试样可以看到,试样中存在大面积的熔合不良缺陷,缺陷尺寸约600~800 μm ,形状不规则,大多分布在层间与道间,其中还存在一些未熔合的合金粉末。当搭接率提高到20%时,熔合不良缺陷的体积分数明显有所降低,缺陷尺寸也减小到了约200~500 μm ,缺陷形状呈不规则条带状或倒三角形[图3(b)]。当搭接率提高到30%时,此时缺陷大小基本在200 μm 以下。搭接率进一步增大为40%时,试样中几乎没有发现缺陷[图3(d)]。熔合不良缺陷形成的原因主要如下^[20-22]:当搭接率过小时,熔覆道与道之间容易形成凹陷,在熔覆下一层时,由于熔池表面张力的作用,以及凹陷内气体的作用,使得新熔池无法完全填充凹陷,进而导致熔覆道与道之间、层与层之间在凹陷部位未熔合好而形成孔洞。

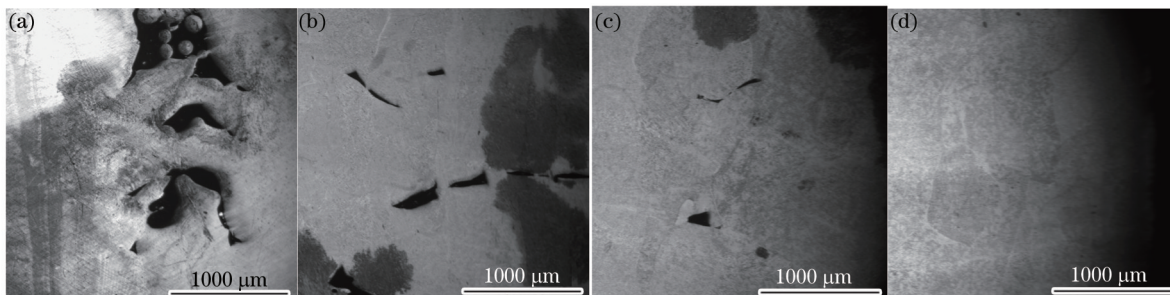


图3 LSF-TC4钛合金熔合不良缺陷

Fig.3 Appearance of ill bonding defects in LSF-TC4 alloy

对4组试样进行超声波无损探伤发现,搭接率不同,超声波检测波形也相应发生改变,如图4所示。图4中横坐标S表示超声波的声程,纵坐标W表示反射回波波幅所占屏幕百分比,T表示始波,F表示缺陷波,B表示底面回波^[23]。当搭接率为0%时,如图4(a)所示,超声波回波比较杂乱,底波基本消失,界面只出现始波,这是由于0%搭接试样中存在大面积的熔合不良缺陷,缺陷与材料的声阻抗相差较大,超声波传播时遇到缺陷与材料的交界处时会发生完全反射,大量的熔合不良缺陷便会对超声波产生散乱反射,探头接收不到反射回来的信号,从而造成草状杂波,引起底波消失。搭接率增大到20%时,因熔合不良缺陷数量减少,超声波出现一、二次底面回波,且两次回波之间存在因缺陷引起的反射回波即缺陷波,如图4(b)所示。搭接率进一步增大至30%时,三次底面回波开始出现,波幅约占满幅的40%,回波之间缺陷波明显减少[图4(c)]。图4(d)所示,当采用40%搭接率时,三次底面回波波幅继续增加,回波根部比较干净,波形图上在满波幅10%~20%处存在小波峰,不过,该试样通过金相观察和X射线检测并未发现任何缺陷,因此这个小波峰可能是由于波形转换或叠加效应引起的迟到杂波。

为更加直观地研究熔合不良缺陷的性质,进一步通过控制激光成形的搭接率和沉积路径,制备出具有一定数量和大小熔合不良缺陷的LSF-TC4试块。图5给出了对该试块采用超声波和射线探伤的波谱和图谱以及熔合不良缺陷的金相图。从图5(a)可知,单个熔合不良缺陷的回波特征为根部清晰,峰值陡上陡下,回

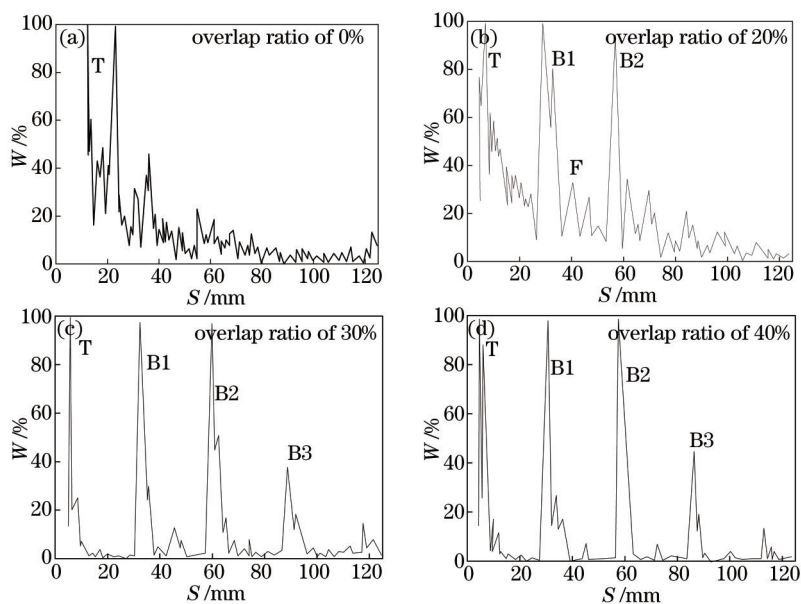


图 4 LSF-TC4 钛合金熔合不良缺陷超声探伤结果

Fig.4 Results of ultrasonic nondestructive detection of ill bonding defects in LSF-TC4 alloy

波呈单峰状出现,图 5(b)所示的 X 射线探伤结果显示,熔合不良缺陷从试样底部贯穿至试样顶部,是一条具有线性性质的通孔。如图 5(c)所示,经金相观察该缺陷大小为 0.6 mm。

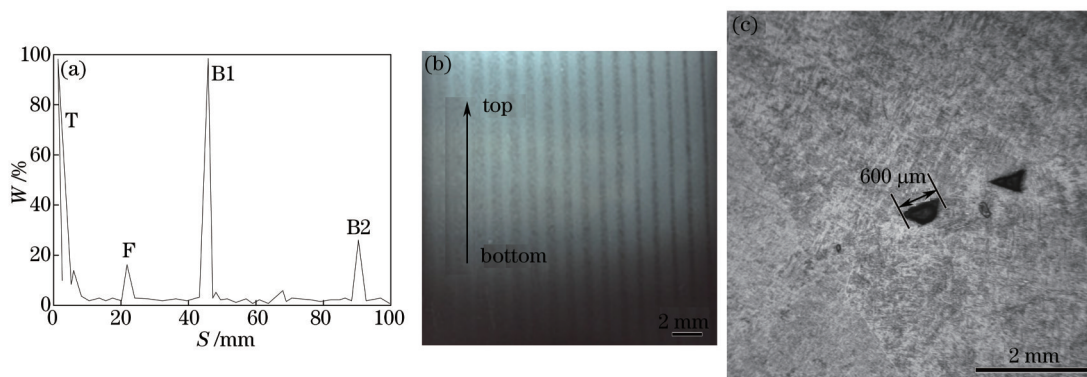


图 5 LSF-TC4 钛合金熔合不良缺陷探伤结果。(a) 超声波波谱; (b) X 射线图谱; (c) 金相图

Fig.5 Results of nondestructive testing of ill bonding defects in LSF-TC4 alloy: (a) Ultrasonic; (b) X-ray; (c) macrography

为定量分析缺陷的大小和埋深对超声回波的影响规律,在无缺陷试样上沿不同深度制备如图 1 所示孔径大小分别为 0.6、1、1.2 mm 的横通孔进行超声波检测。图 6 所示为当探头放置试块 B 面上进行探伤时 LSF-TC4 合金内部横通孔的超声相控阵探伤结果图。孔 1~9[分别对应图 6(a)~(i)]在相控阵 A-S 扫描图中的 A 扫描波形和 S 扫描图中均有清晰的显示,在横通孔对应的位置上 S 扫描图中会出现一个相应的缺陷斑点, A 扫描图中相应的位置也会出现一个缺陷回波。从检测结果可知,当横通孔距离检测表面深度一致时,孔径越大,反射回波高度越高;对于同一直径的横通孔,横通孔距离检测表面深度越大,反射回波幅值就越小。

3.2 表面及近表面孔洞类缺陷结果分析

3.2.1 槽型缺陷回波的静态波形特征

图 7 所示为对具有表面槽型缺陷的 4 mm 厚 LSF-TC4 钛合金薄板进行超声波扫查时的回波波形。可以看到,当槽朝上时,进行超声扫查时能明显发现槽的缺陷波形,缺陷波有两条主要的波峰[图 7(a)]。这主要是在表面波传播过程中,遇到槽的第一条棱边时发生反射,反射回波被探头接收便在显示屏上出现左边峰值较高的一条波峰。而后表面波继续沿着槽的垂直方向轮廓进行传播直至到达槽的底面再次发生反射,反射回波形成右边一条峰值较低的回波。与槽型缺陷朝上进行扫查时的超声回波波形有所不同,当槽型缺陷朝下时,进行扫查时的超声回波如图 7(b)所示,探伤时以触摸法进行干扰,在试样端面波之前并未发现槽型缺

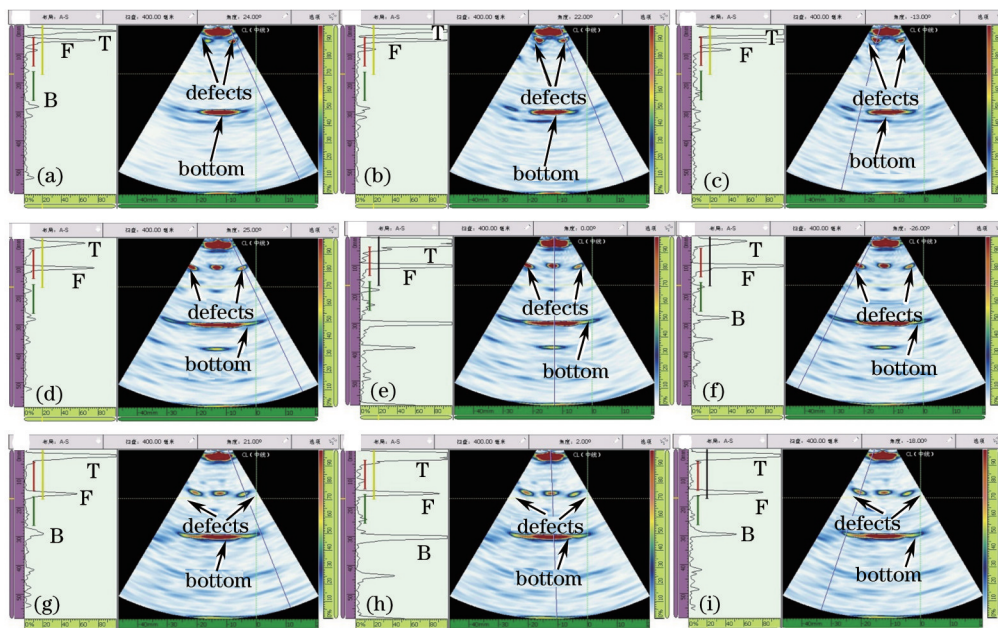


图6 LSF-TC4横通孔的超声相控阵探伤结果图。(a)孔1; (b)孔2; (c)孔3; (d)孔4; (e)孔5; (f)孔6; (g)孔7; (h)孔8; (i)孔9
 Fig.6 Results of phased array testing of long horizontal hole in LSF-TC4 alloy. (a) hole 1; (b) hole 2; (c) hole 3; (d) hole 4; (e) hole 5; (f) hole 6; (g) hole 7; (h) hole 8; (i) hole 9

陷回波,但在试样端面回波之后,出现一条峰值相对较低的回波,由回波声程所显示的传播距离可知此回波是表面波沿试板由上表面传播到试样端面,再经下表面继续传播遇到缺陷时产生的缺陷回波,即表面波沿深度方向发现缺陷的能力小于4 mm。

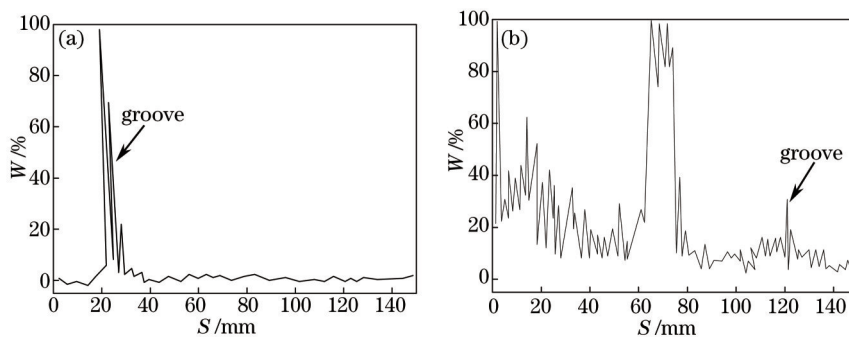


图7 LSF-TC4钛合金薄板槽型缺陷超声回波波形。(a)槽型朝上; (b)槽型朝下
 Fig.7 Results of ultrasonic nondestructive detection of groove defects on the surface of LSF-TC4 alloy: (a) Groove is on the top; (b) Groove is at the bottom

3.2.2 槽型缺陷回波的动态波形特征

不同深度槽型缺陷前后扫查的超声回波动态波形如图8所示。通过三组槽型缺陷的超声动态波形比较可以发现,对于深度 H 为1 mm的槽型缺陷,如图8(a)所示。当在探头前端距离缺陷水平距离30 mm范围内进行扫查时,超声回波波幅的整体水平较高,35~40 mm范围内较平坦,20~30 mm范围内,缺陷回波波幅达到最大。如图8(b)、(c)所示深度为2 mm和3 mm的槽型缺陷,两者距离-波幅曲线(DAC)基本类似,在探头前端距离缺陷10 mm之前超声回波波幅的整体水平较高,且均在5 mm左右的位置处超声波能量最为集中,波幅达到最大值。经比较可以得知,当检测表面较浅的裂纹类缺陷时,探头前沿距离缺陷10~30 mm时表面波发现缺陷的能力较高;当检测深度为2 mm以下的近表面缺陷时,探头前沿距离缺陷5~10 mm时发现缺陷的能力较高。

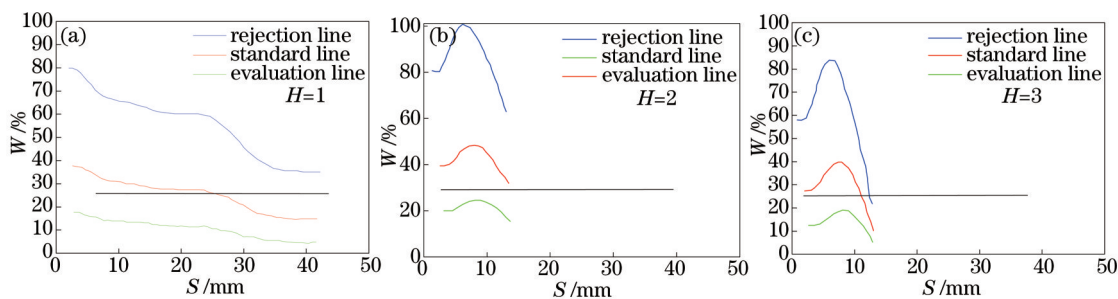


图8 LSF-TC4钛合金薄板槽朝上DAC曲线

Fig.8 DAC of LSF-TC4 alloy when groove is on top

3.2.3 孔型缺陷回波的静态波形特征

图9所示为对具有表面孔型缺陷的LSF-TC4钛合金薄板进行超声波扫查时的回波波形。可以看到,当孔型缺陷朝上时,进行超声波扫查能明显发现孔的缺陷回波,缺陷波呈单峰状,峰值尖锐,波宽较窄,波形陡上陡下,变化迅速,如图9(a)所示。与孔型缺陷朝上时的扫查结果有所不同,孔型缺陷朝下时,进行超声波扫查时,在试样端面回波之前并未发现孔型缺陷回波[图9(b)],即表面波沿深度方向发现孔型缺陷的能力小于4 mm,且孔型缺陷与槽型缺陷相比更难被发现。

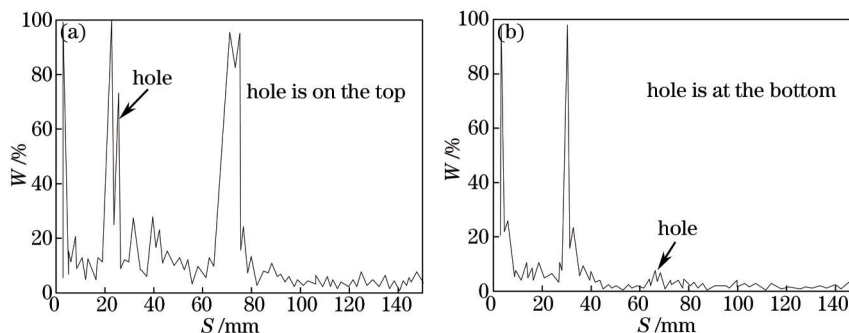


图9 LSF-TC4钛合金薄板孔型缺陷超声回波波形

Fig.9 Results of ultrasonic nondestructive testing of hole defects on surface of LSF-TC4 alloy

3.2.4 孔型缺陷回波的动态波形特征

超声波的波束是具有一定扩散角度的锥形波束,当声束轴线遇到缺陷而产生反射回波时,超声回波波幅达到最大值,当声束轴线偏离缺陷即使很小的角度时,超声回波波幅也会迅速降低,导致超声波散射严重。对于孔型缺陷,缺陷侧壁为圆柱面,超声波遇到该柱面时,只要声束轴线偏离柱面轴线,超声波便会发生散射,致使回波能量降低,波幅减小。试验中发现,当探头左右调节使声束轴线与柱面中心线重合时,回波波幅达到最大值,回波根部干净无杂波。探头继续左右调节使声束轴线偏离柱面中心线时,回波幅度降低且出现多峰,根部这些小波幅回波便是由于柱面侧壁对超声波的散射作用造成的。从图10(a)知,对于 $\Phi 1.5$ mm孔型缺陷而言,在探头前端距离缺陷水平距离10~30 mm范围扫查时超声波回波幅度整体水平较高,在20 mm位置时超声波的能量最为集中。对于直径分别为2、2.5、3 mm的孔型缺陷,尽管超声回波动态波形虽略有差别,但整体走势相差无几,均在探头前端距离缺陷水平距离10~30 mm范围扫查时超声波回波幅度整体水平较高,在20 mm位置时超声波的能量最为集中,20~30 mm范围内波幅变化不大较为平坦,如图10(b)~(d)所示。综上可知,对于孔型缺陷而言,缺陷的大小对超声表面波的扫查灵敏度影响较小。

4 结论

- 1) 在相同检测条件下,对于同深度不同孔径的长横孔缺陷,反射波幅值随长横孔直径的增加而增加,对于同孔径不同深度的长横孔缺陷,反射波幅值随长横孔所在深度的增加而减小;利用5P Φ 8纵波直探头,能发现激光立体成形TC4钛合金中0.6 mm大小的孔洞类缺陷;
- 2) 表面波沿深度方向发现槽型和孔型缺陷的能力均小于4 mm,且孔型缺陷比槽型缺陷更难发现;

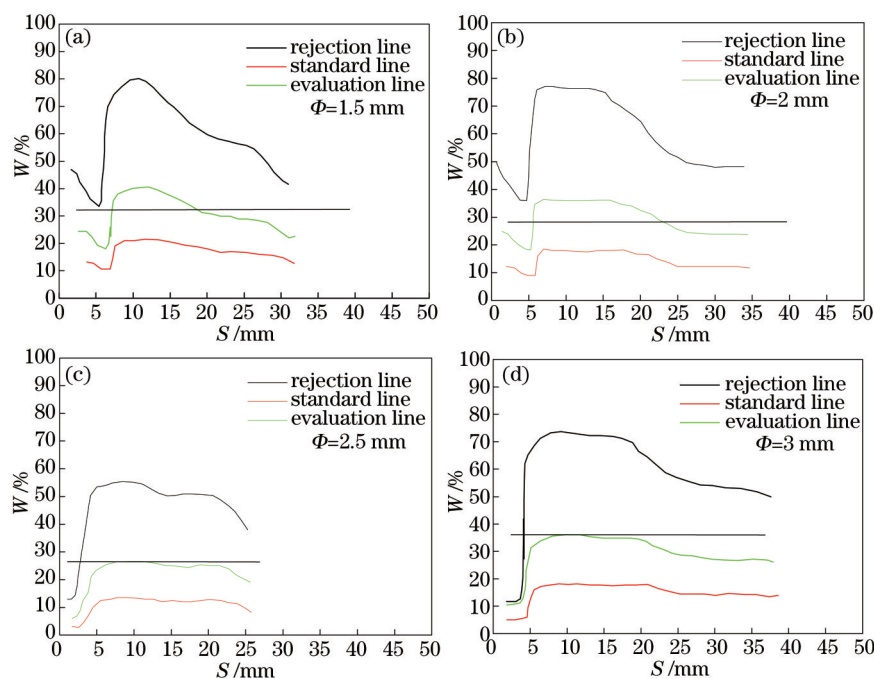


图 10 LSF-TC4 钛合金薄板孔朝上 DAC 曲线

Fig.10 DAC curve of LSF-TC4 alloy when hole is on the top

3) 利用 5 MHz \times 6BM 表面波探头进行探伤,对于槽型(平面型)缺陷而言,缺陷深度大于 2 mm 时,探头前沿距离缺陷水平距离 5~10 mm 范围内表面波发现缺陷的能力较高;缺陷深度小于 2 mm 时,探头前沿距离缺陷水平距离 10~30 mm 范围内表面波发现缺陷的能力较高。对于孔型缺陷而言,探头前端距离缺陷水平距离 10~30 mm 范围内扫查时反射波幅度整体水平较高,在 20 mm 位置时超声波的能量最为集中,孔型缺陷大小对超声表面波的扫查灵敏度影响较小。

参 考 文 献

- 1 L Lineberger. Titanium aerospace alloy[J]. *Advanced Materials and Processes*, 1998, 153(5): 45-46.
- 2 Qian Jiuhong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2000, 24(3): 218-221.
钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. *稀有金属*, 2000, 24(3): 218-221.
- 3 Feng Liping, Huang Weidong, Li Yanming, *et al.*. Investigation on the microstructure and composition segregation of the laser metal forming directional solidification[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(5): 501-506.
冯莉萍, 黄卫东, 李延民, 等. 激光金属成形定向凝固显微组织及成分偏析研究[J]. *金属学报*, 2002, 38(5): 501-506.
- 4 Xu Xiaojing, Lin Xin, Yang Mocong. Dendrite structure evolution in Ti-20%Ni alloy prepared by laser solidforming[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(8): 1013-1018.
许小静, 林 鑫, 杨模聪. 激光立体成形 Ti-20%Ni 合金枝晶的组织演化[J]. *金属学报*, 2008, 44(8): 1013-1018.
- 5 Xu Xiaojing, Lin Xin, Huang Weidong, *et al.*. Microstructure and mechanical property of Ti-80%Ni alloy prepared by laser solid forming [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9): 1081-1085.
许小静, 林 鑫, 黄卫东, 等. 激光立体成形 Ti-80%Ni 合金显微组织及力学性能[J]. *金属学报*, 2010, 46(9): 1081-1085.
- 6 Lin Xin, Yang Haiou, Chen Jing, *et al.*. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(4): 361-368.
林 鑫, 杨海欧, 陈 静, 等. 激光快速成形过程 316L 不锈钢显微组织的演变[J]. *金属学报*, 2006, 42(4): 361-368.
- 7 Liu Fencheng, Lin Xin, Yang Gaolin. Microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickle base superalloy inconel 718 prepared in different atmospheres[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9): 1047-1054.
刘奋成, 林 鑫, 杨高林. 不同气氛激光立体成形镍基高温合金 Inconel 718 的显微组织和力学性能[J]. *金属学报*, 2010, 46(9): 1047-1054.
- 8 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(7): 1263-1266.

- 张霜银, 林 鑫, 陈 静, 等. 热处理对激光立体成形 TC4 合金的组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1263-1266.
- 9 Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
- 黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- 10 Zhang Fengying, Tan Hua, Chen Jing. Mechanical properties of laser solid formed Ti-Al-V ternary system titanium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0603004.
- 张凤英, 谭 华, 陈 静. 激光立体成形 Ti-Al-V 系的合金力学性能[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0603004.
- 11 Chen Bo, Shao Bing, Liu Dong. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC 17 titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403001.
- 陈 博, 邵 冰, 刘 栋. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403001.
- 12 Zhao Weiwei, Lin Xin, Liu Fencheng. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming inconel 718 super alloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3220-3225.
- 赵卫卫, 林 鑫, 刘奋成. 热处理对激光立体成形 Inconel718 高温合金组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3220-3225.
- 13 Zhang Ying, Lin Xin, Yang Gaolin. Structural characteristics of laser solid forming Zr-based bulk metallic glass[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303005.
- 14 Pan Hu, Zhao Jianfeng, Liu Yunlei, *et al.*. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloys by laser cladding repairation [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
- 潘 浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.
- 15 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(10): 1839-1843.
- 张霜银, 林 鑫, 陈 静. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(10): 1839-1843.
- 16 Ruan Xueqian, Lin Xin, Huang Chunping. Effect of microstructure of laser solid forming TC4 alloy on ultrasonic parameters[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0103005.
- 阮雪茜, 林 鑫, 黄春平. TC4 激光立体成形显微组织对超声参量的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103005.
- 17 Yang Haiou, Song Menghua, Yang Donghui. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming[J]. Applied Laser, 2011, 31(5): 384-390.
- 杨海欧, 宋梦华, 杨东辉. 激光立体成形 300 M 超高强度钢的组织演化[J]. 应用激光, 2011, 31(5): 384-390.
- 18 Xu Qingdng, Lin Xin, Song Menghua. Microstructure of heat-affected zone of laser forming repaired 2Cr13 stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(5): 605-613.
- 徐庆东, 林 鑫, 宋梦华. 激光成形修复 2Cr13 不锈钢热影响区的组织研究[J]. 金属学报, 2013, 49(5): 605-613.
- 19 Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
- 黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- 20 Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua. Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 211-215.
- 张凤英, 陈 静, 谭 华. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 211-215.
- 21 Zhang Fengying, Tan Hua, Chen Jing. Investigation on formation of defects in laser solid forming of titanium alloys from blended elemental powders[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(14): 1-9.
- 张凤英, 谭 华, 陈 静. 元素混合法激光立体成形钛合金过程中缺陷形成研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 1-9.
- 22 Wang Wei. Research on III bonding of Ti-6Al-4V Titanium Alloy in Laser Rapid Repair Processing[D]. Northwestern Polytechnic University, 2007.
- 王 维. TC4 合金激光快速修复过程中熔合不良缺陷的评价研究[D]. 西北工业大学, 2007.
- 23 Zheng Hui. Ultrasonic Testing[M]. Beijing: China Labor and Social Security Press, 2008: 64-68.
- 郑 晖. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008: 64-68.

栏目编辑: 宋梅梅